

(21) 埋設管の実測ひずみに基づく地震時地盤ひずみの推定

フジタ工業株式会社技術研究所 正員 ○中村正博
 東京大学生産技術研究所 正員 片山恒雄
 東京大学生産技術研究所 正員 久保慶三郎

1. はじめに

埋設管をはじめ沈埋トンネルや地下タンクなどの地中構造物の建設は、今後とも特に大都市周辺で増加の傾向にあると思われ、これらの耐震性の検討がますます重要な課題となりつつある。大部分の地上構造物の地震時挙動が慣性力に強く支配されるのに対し、地中構造物の耐震性は地震時に地盤に生ずる相対変位（すなわち地盤ひずみ）に大きな影響を受ける。この考えを反映して、地中構造物の現行の耐震計算法では、地震時の地盤の変位分布を仮定し、これをばねを介して構造物に作用させる「応答変位法」が用いられることが多い。^{1)~3)}

一般に、地震時の地盤ひずみを直接測定することは難しく、地震時地盤ひずみに関する従来の研究では、地震動の加速度記録を基にした検討が大部分である。^{4)~6)} これに対し、埋設管の地震時ひずみの測定は比較的容易であるため、実測結果に基づく定量的な解析も行われている。^{7)~14)} これらの研究は特定の地盤内に埋設された特定構造物の地震時ひずみを詳細に検討したものであり、それぞれ有用な工学的情報を提供しているが、より一般性のある特性を抽出するためには、異なる条件下での実測結果を総合的に検討する必要がある。また、従来の研究成果によれば、地震時地盤ひずみの管体ひずみへの伝達率は1に近く、埋設管ひずみの値はほぼ周辺地盤のひずみに等しいと考えやすい場合が多い。したがって、埋設管の実測ひずみから近似的に地盤のひずみを推定してみることは工学的に有用であろう。

本報告は、以上の観点から、近年多くの機関で独立に行われてきた埋設管の地震時ひずみの測定結果をできるだけ多数収集し、それらを統一的に眺めることによって、地中構造物の耐震設計に役立つ地盤ひずみを近似的に推定しようとしたものである。

2. 近似的な地盤ひずみとしての埋設管の実測地震時ひずみ

対象とした地震記録は、1972年から1980年の8年間に7ヶ所の埋設管で測定されたものであり、^{* 8)~14)} 地震数が46、実測ひずみデータで60である。なお、これらの地震および観測結果の一覧は参考文献(15)に与えられている。

埋設管の地震時ひずみが、地震動の加速度振幅よりも速度振幅に密接に関連しているという議論は多い。¹⁾ しかしながら、従来の地震動観測は主として加速度型地震計により実施されており、地震動の速度記録の蓄積は現状ではきわめて少ない。そこで、はじめに埋設管の地震時ひずみ ϵ_L と地震動最大加速度 α_x の関係について調べる。

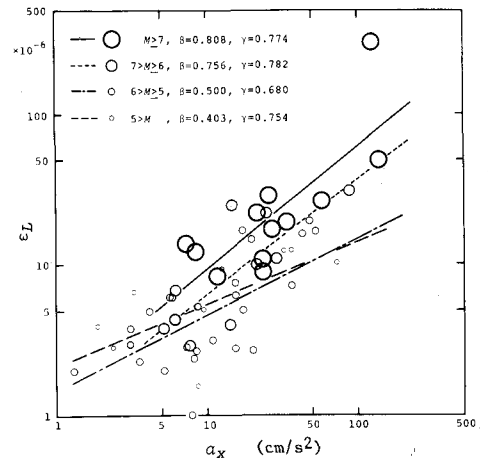


図-1 埋設管の地震時軸ひずみ ϵ_L と管軸方向の地震動最大加速度 α_x の関係

図-1は、埋設管の軸ひずみ ϵ_L と軸方向加速度 α_x の関係を示したものであり、図中の直線は、マグニチュードの範囲*

*) 参考文献(11)、(12)の埋設管は耐震ダクタイル管であり、伸縮継手部の効果のために、実際に管体が発生したひずみは小さいが、本報告では同観測所に設置されている管体ひずみ計、継手部伸縮計、地盤ひずみ計による実測値のうち、(11)では地盤ひずみ計の値を、また(12)では管体ひずみ計と継手部伸縮計の値の和を、埋設管のひずみとして用いている。

とに求めた回帰直線

$$\log \epsilon_L = \alpha + \beta \log a_x \quad (1)$$

である(表-1参照)。この図から、同じ程度の最大加速度の値に対して、マグニチュードの大きな地震の方が大きな地震時ひずみを生じさせる場合が多いこと、また、マグニチュードの大きい地震ほど式(1)の β の値が1に近付くことがわかる。図-2および3は、地震動強さのパラメータとして、軸直角方向および上下方向の最大加速度を用いた同様の図であるが、いずれの場合においても、図-1と同じ傾向がみられる。図-1, 2, 3(または表-1)に示された相関係数の値による限り、どの方向の地震動が管の軸ひずみと最も高い相関を有するかを判断することは難しいが、一般に埋設管の地震時軸ひずみが地震動の最大加速度と予想以上に高い相関を示すことは注意しておいてよい。

式(1)で $\beta=1$ のとき、ひずみ ϵ_L と加速度 a_x の関係は $\epsilon_L = 10^\alpha \cdot a_x \quad (2)$

と表わされ、ひずみが最大加速度に正比例することになる。図-1, 2, 3に現われている傾向は、大規模な地

表-1 回帰式の一覧表($Y=\alpha+\beta X$)

	N*	Y	X**	α	β	γ^*	σ_y^*	$10^{\alpha\gamma}$	Remarks
M>7	12	log ϵ_L	log a_x	-5.83	0.808	0.774	0.257	1.81	See Fig.1
7>M>6	10	log ϵ_L	log a_x	-5.94	0.756	0.782	0.222	1.67	
6>M>5	26	log ϵ_L	log a_x	-5.82	0.500	0.680	0.248	1.77	
5>M	11	log ϵ_L	log a_x	-5.65	0.403	0.754	0.204	1.60	
M>7	11	log ϵ_L	log a_y	-5.85	0.868	0.908	0.204	1.60	See Fig.2
7>M>6	8	log ϵ_L	log a_y	-6.06	0.836	0.736	0.217	1.65	
6>M>5	19	log ϵ_L	log a_y	-5.84	0.530	0.524	0.294	1.97	
5>M	8	log ϵ_L	log a_y	-5.71	0.446	0.644	0.218	1.65	
M>7	6	log ϵ_L	log a_z	-5.68	1.06	0.823	0.0938	1.24	See Fig.3
7>M>6	3	log ϵ_L	log a_z	-5.57	0.757	0.879	0.0997	1.26	
6>M>5	10	log ϵ_L	log a_z	-5.60	0.619	0.784	0.169	1.48	
5>M	7	log ϵ_L	log a_z	-5.45	0.496	0.872	0.121	1.32	
$\Delta > 150$	21	log ϵ_L	log a_x	-5.83	0.796	0.862	0.240	1.74	See Fig.4
$\Delta < 150$	38	log ϵ_L	log a_x	-5.86	0.570	0.745	0.253	1.79	
M>7	12	log ϵ_L	log ($a_x \cdot T/2\pi$)	-5.20	1.02	0.944	0.134	1.36	See Fig.5
7>M>6	10	log ϵ_L	log ($a_x \cdot T/2\pi$)	-5.22	0.706	0.847	0.189	1.55	
6>M>5	26	log ϵ_L	log ($a_x \cdot T/2\pi$)	-5.32	0.494	0.776	0.213	1.63	
5>M	11	log ϵ_L	log ($a_x \cdot T/2\pi$)	-5.25	0.412	0.813	0.181	1.52	
SHIMONAGA	7	log ϵ_L	log v_x	-5.00	1.06	0.934	0.178	1.51	See Fig.6
KANSEN	10	log ϵ_L	log v_x	-5.34	0.979	0.876	0.219	1.66	
ALL	17	log ϵ_L	log v_x	-5.21	1.16	0.898	0.259	1.82	

* N=Number of data, γ =Coefficient of correlation, σ_y =Standard deviation about regression line

** a_x, a_y, a_z : (cm/s²), T: (s), v_x : (cm/s)

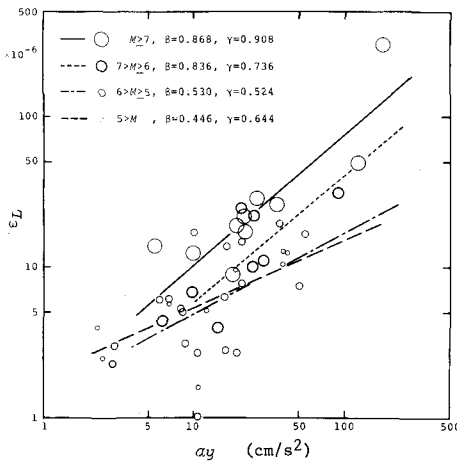


図-2 埋設管の地震時軸ひずみ ϵ_L と管軸直角方向の地震動最大加速度 a_y の関係

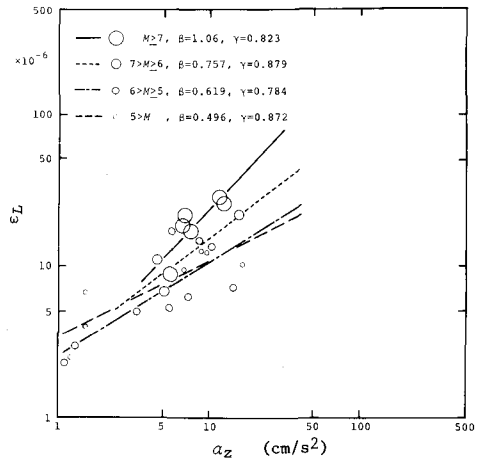


図-3 埋設管の地震時軸ひずみ ϵ_L と上下方向の地震動最大加速度 a_z の関係

震による埋設管の軸ひずみは地震動最大加速度に比例することを示している。

図-4には、図-1に用いた同じデータを震央距離 Δ (km)が $\Delta \geq 150$ と $\Delta < 150$ の2種類に区分し、震央距離の大小による埋設管の軸ひずみ ε_L と軸方向加速度 a_x の関係を示した。この図から、最大加速度が同じならば遠距離地震の方が近距離地震よりも大きなひずみを生じさせることがわかる。また、遠距離地震の方が β の値が1に近くなっている。一般に $\Delta \geq 150$ のデータにはマグニチュードの大きい地震が多く含まれていることを考え合わせれば、同じ地震動加速度のレベルに対し、マグニチュードが大きい遠距離地震の方が埋設管に大きなひずみを生じさせ、しかもこのような場合には埋設管のひずみと地震動最大加速度はほぼ正比例の関係にあるといえる。

以上の検討では、観測地点の地盤条件の影響が全く考慮されていない。そこで、地盤の固有周期 T を用い、速度の次元をもつパラメータ($a_x \cdot T / 2\pi$)に対して埋設管の軸ひずみ ε_L をプロットし、図-5に示した。ここに、地盤の固有周期 T は、層厚 H とせん断波速度 V_s から次式によって推定した。 $T = 4 \sum \frac{H_i}{V_{si}}$ (3) 図-1と比較すると、図-5ではすべての回帰式の相関係数が高くなっていることが注目される。特に、 $M \geq 7$ のデータについては、相関係数が $\gamma = 0.94$ となっている。このことは、埋設管の軸ひずみは加速度より速度との相関が高いことを示唆している。また、マグニチュードごとの回帰式の傾き β は、 M が大きいはほど1に近づいている。 $M \geq 7$ の回帰式では $\beta \approx 1$ であり、埋設管の軸ひずみが($a_x \cdot T / 2\pi$)に正比例していることがわかる。

埋設管ひずみと同時に地震動の速度記録が直接得られている観測例はきわめて少なく、八戸市上水道の幹線観測所⁽¹¹⁾、同じく下長観測所⁽¹²⁾での計17にすぎない。幹線観測所の地盤は、地表面下20m付近に工学的には基盤と考えられる砂岩層($V_s = 510$ m/s, $V_p = 2300$ m/s, $\rho = 2.1$ t/m³)があり、表層は砂質のローム層、粘土層および砂礫層からなる。また、式(3)で推定した地盤の固有周期は $T = 0.44$ sである。下長観測所の地盤は、地表面下40mに基盤とみなされる層($V_s = 470$ m/s,

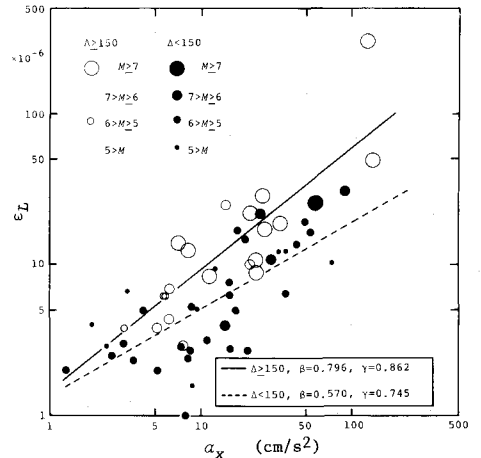


図-4 震央距離 Δ の大小による埋設管の軸ひずみ ε_L と軸方向加速度 a_x の関係

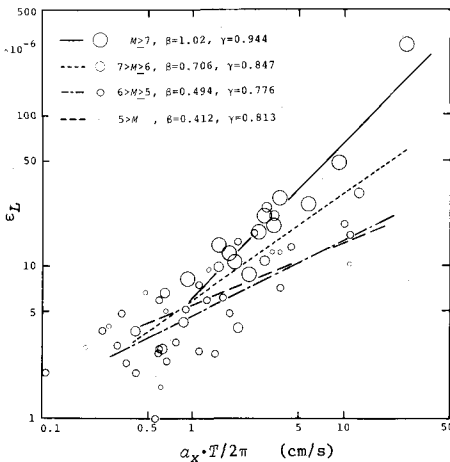


図-5 埋設管の軸ひずみ ε_L と($a_x \cdot T / 2\pi$)の関係

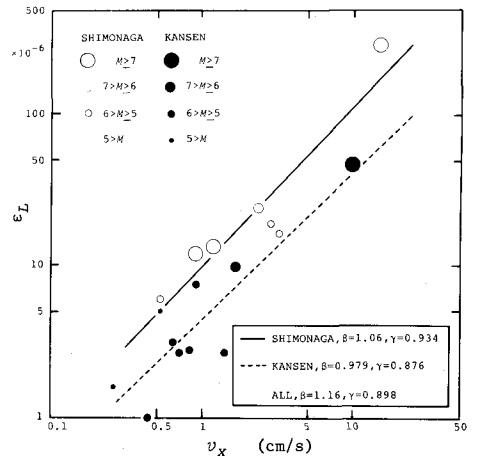


図-6 埋設管の地震時軸ひずみ ε_L と管軸方向の地震動最大速度 v_x の関係

$V_p = 2300 \text{ m/s}$, $\rho = 2.1 \text{ t/m}^3$ がある。表層は腐蝕土層および軟質の砂層、シルト層からなり、平均M値が7の典型的な軟弱地盤で、地盤の固有周期は1.3sである。図-6は、これら2つの地点における埋設管の軸ひずみ ϵ_L を実測された軸方向地震動速度の最大値 U_x に対して示したものである。図中の2本の回帰直線は、それぞれ幹線観測所および下長観測所のデータから求めたものであり、図-5に示したようなマグニチュードごとの回帰式ではない。回帰式の相関係数は0.9前後であり、埋設管の軸ひずみと地震動の実測速度との相関が高いことがわかる。また、図-6から地盤の固有周期の長い下長観測所の方が大きなひずみを生じていることがわかる。

図-6の回帰直線の傾き β はいずれの場合もほぼ1.0とみなされるから、実測ひずみ ϵ_L と地震動速度の最大値 U_x の関係は近似的に

$$\epsilon_L = 10^\alpha \cdot U_x \quad (4)$$

となる。一方、単純化した状態での波動伝播によって埋設管に生じるひずみ ϵ_L は、地震動の速度振幅を U_x (cm/s)、波動の伝播速度を C (m/s)として、近似的に

$$\epsilon_L = U_x / (100C) \quad (5)$$

で与えられる。式(4)と(5)から得られる

$$C = 10^{2-\alpha} \quad (\text{m/s}) \quad (6)$$

なる関係式を用いて、幹線観測所および下長観測所の波動伝播速度を計算すると2200 (m/s) および1000 (m/s)となる。これらの値は、それぞれの地盤における平均的な見掛けの波動伝播速度と考えられるが、両地盤における基盤のせん断波速度の値、すなわち510 (m/s) および470 (m/s) よりかなり大きな値となっている。

一般に、基盤が表層より硬い通常の地盤では、S波はもちろん表面波の場合にも、波動の伝播速度が基盤のS波速度の値より大きくなることはない。しかしながら、成層地盤に直管が埋設されている場合、管軸に対する波動の入射角を ϕ とすると見掛けの伝播速度 $C / \cos \phi$ は、 C から無限大までの値をとりうる。したがって、いろいろな入射角をもつ地震で実測されたひずみ ϵ_L と速度 U_x から式(6)で求めた平均的な伝播速度の値は、基盤のS波速度より大きくなることもありうる。そこで、個々の地震における実測値 ϵ_L 、 U_x を直接、式(5)に代入して伝播速度を計算し、このうち最も小さい値を与える伝播速度に着目すると、幹線観測所および下長観測所でそれぞれ1000 (m/s)、500 (m/s)となり、基盤のS波速度に近づいてくる。このことは、工学的地震基盤におけるS波速度を用い、式(5)によってひずみ ϵ_L を推定しても、まだ推定ひずみは大きめであることを示唆している。

3. あとがき

本報告は、埋設管ひずみの値がほぼ周辺地盤のひずみに等しいとの観点に立ち、埋設管の実測ひずみから近似的に地盤のひずみを推定しようとしたものであるが、前述の結果の解釈にあたっては、特に以下の諸点に注意する必要がある。(1)大マグニチュード、近距離の地震によるデータがほとんど無く、測定ひずみの最大値も 300×10^{-6} である。(2)地震動の速度記録が得られているデータは少ない。(3)地盤の固有周期の推定は成層地盤を仮定して行い、特に深い層までの構造がわがっている場合をのぞいて、 $V_s \geq 300 \text{ m/s}$ の地盤を工学的な基盤と考えている。(4)埋設管は必ずしも直管ではないが、原則的には形状変化による影響の少ないと思われる実測値を用いている。いま、埋設管に被害が生じるであろう地震動最大加速度として、仮に $a_x = 500 \text{ cm/s}^2$ を考えると、図-1のM ≥ 7 の回帰式から得られる埋設管の軸ひずみはたかだか 10^{-4} 程度である。常識的に考えれば、埋設管が一樣なひずみを生じるとき、この程度のひずみで破壊するとは思えない。さらに強震時の地盤ひずみを埋設管ひずみで近似的に推定することにも無理があり、現時点では

強震時に対して本報告の結果を外挿することには問題がある。

謝辞：本研究を行うにあたり貴重な実測資料を御提供いただいた下記の方々に、深甚なる謝意を表します。

神奈川東広域水道企業団	西塚正美
久保田鉄工株式会社	北条貞宗、岩本利行、若井伸彦
新日本製鉄株式会社	辻本 潤、大塚史雄
東京瓦斯株式会社	宇根史雄、塚本貞良

参考文献

- 1) 石油パイプライン事業用地盤の技術工の基準の細目を定める告示、通商産業省、運輸省、建設省、自治省告示第1号、1973。
- 2) 埋設トンネル相関設計(案)、土木学会、1975。
- 3) 地下貯油施設技術(案)、土木学会、1980。
- 4) 神山、土木学会論文報告集、第250号、1976。
- 5) 土城、日本セメント・ライフライン社、1976。
- 6) 藤田、J.P. Wright、土木学会論文報告集、第299号、1980。
- 7) 板井、葛城、堤也、電力中央研究所報告、No. 67058、1967。
- 8) 西尾、宇根、塚本、第5回日本地震工学シンポジウム、1978。
- 9) 西尾、加室、米山也、東京瓦斯技術研究所報告、第2号、1977。
- 10) 西尾、米山、宇根也、東京瓦斯技術研究所報告、第2号、1977。
- 11) 小野木、北条、岩本、第5回日本地震工学シンポジウム、1978。
- 12) 小野木、北条、岩本、第5回日本地震工学シンポジウム、1978。
- 13) 管内、辻本、第7回世界地震工学会議、1980。
- 14) 藤田、西原、葛城、水道協会誌、第55号、1980。
- 15) 中村、内山、久保、Bulletin of E.R.S., No. 14, 1981。
- 16) 北条、岩本、若井、第35回土木学会年次学術発表会、1980。
- 17) 佐藤、弾性波動論、岩波書店、1978。